



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 53906

(13) A

(51) 7 G01R11/54

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС

ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ
НА ВИНАХІДВИДАЄТЬСЯ ПІД
ВІДПОВІДАЛЬНІСТЬ
ВЛАСНИКА
ПАТЕНТУ**(54) СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ АКТИВНОЇ ЕНЕРГІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ, ЩО ВКЛЮЧАЮТЬ ТРАНСФОРМАТОРИ СТРУМУ І НАПРУГИ З ВІДОМИМИ МЕТРОЛОГІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

1

2

(21) 2002021414

(22) 19 02 2002

(24) 17 02 2003

(46) 17 02 2003, Бюл №2, 2003 р

(72) Бебко Валентин Григорович, Квицинський
Анатолій Олександрович, Керніцький Микола
Васильович(73) Бебко Валентин Григорович, Квицинський
Анатолій Олександрович, Керніцький Микола
Васильович(57) Спосіб вимірювання активної енергії за
допомогою вимірювального комплексу, що
складається з приладу для вимірювання активної
потужності (енергії) і вимірювальних
трансформаторів струму та напруги, який
відрізняється тим, що вимірювання здійснюють у
такій послідовностіекспериментально визначають залежності
фазових $\Delta\varphi_I(I_1)$ і амплітудних $\delta_I(I_1)$ похибок
трансформаторів струму від струму їх первинних
обмоток або виконують інтерполяцію цих
залежностей за результатами заводських
випробувань,експериментально визначають залежності
фазових $\Delta\varphi_U(S_U)$ і амплітудних $\delta_U(S_U)$ похибок
трансформатора напруги від завантаження його
вторинних кіл або виконують інтерполяцію цих
залежностей за результатами випробувань,
вимірюють завантаження вторинних кіл
трансформатора напруги S_U ,в комплекс для вимірювання спожитої активної
енергії, який складається з вимірювальних
трансформаторів і приладу для вимірювання
активної потужності (енергії), вмикають прилад
для вимірювання реактивної потужності (енергії),
виконують вимірювання активної $P_B(I_2, U_2)$ і
реактивної $Q_B(I_2, U_2)$ потужностей (активної
 $WP_B(I_2, U_2)$ і реактивної $WQ_B(I_2, U_2)$ енергії) у
копі за допомогою увімкнених приладів, а
фактичну спожиту активну енергію обчислюють за
формулами

$$WP_{\Phi}(I_1, U_1) =$$

$$= k_U \cdot k_I \sum_n [P_B(I_{2n}, U_{2n}) \cdot \cos(\Delta\varphi_U(S_{Un}) - \Delta\varphi_I(I_{1n})) +$$

$$+ Q_B(I_{2n}, U_{2n}) \cdot \sin(\Delta\varphi_U(S_{Un}) - \Delta\varphi_I(I_{1n}))] \times$$

$$\times (1 - \delta_U(S_{Un}) - \delta_I(I_{1n}) + \delta_U(S_{Un}) \cdot \delta_I(I_{1n})) \cdot T_n$$

або

$$WP_{\Phi}(I_1, U_1) =$$

$$= k_U \cdot k_I \sum_n [WP_B(I_{2n}, U_{2n}) \cdot \cos(\Delta\varphi_U(S_{Un}) - \Delta\varphi_I(I_{1n})) +$$

$$+ WQ_B(I_{2n}, U_{2n}) \cdot \sin(\Delta\varphi_U(S_{Un}) - \Delta\varphi_I(I_{1n}))] \times$$

$$\times (1 - \delta_U(S_{Un}) - \delta_I(I_{1n}) + \delta_U(S_{Un}) \cdot \delta_I(I_{1n})),$$

де k_I - номінальний коефіцієнт трансформації
трансформатора струму, k_U - номінальний коефіцієнт трансформації
трансформатора напруги, $P_B(I_{2n}, U_{2n})$ - покази приладу для вимірювання
активної потужності в n-ний часовий інтервал,
 $Q_B(I_{2n}, U_{2n})$ - покази приладу для вимірювання
реактивної потужності в n-ний часовий інтервал, $\Delta\varphi_U(S_{Un})$ - фазова похибка трансформатора
напруги потужності в n-ний часовий інтервал, $\Delta\varphi_I(I_{1n})$ - фазова похибка трансформатора
струму потужності в n-ний часовий інтервал, $\delta_U(S_{Un})$ - амплітудна похибка трансформатора
напруги потужності в n-ний часовий інтервал, $\delta_I(I_{1n})$ - амплітудна похибка трансформатора
струму потужності в n-ний часовий інтервал, T_n - тривалість n-ного часового інтервалу із сталим
навантаженням, $WP_B(I_{2n}, U_{2n})$ - спожита за показами приладу
активна енергія в n - ний часовий інтервал із
сталім навантаженням, $WQ_B(I_{2n}, U_{2n})$ - спожита за показами приладу
реактивна енергія в n - ний часовий інтервал із
сталім навантаженням

(13) A

(11) 53906

(19) UA

Винахід відноситься до вимірювальної техніки, а саме - до способів вимірювання активної енергії за допомогою вимірювальних комплексів, які складаються з вимірювальних приладів і трансформаторів струму і напруги з відомими метрологічними характеристиками

Відомий спосіб вимірювання активної енергії і засоби для його реалізації (Электрические измерения. Общий курс /Под ред. А.В. Фремке - М - Л. Гос. энергетическое изд., 1963 - 429 с), згідно якого спожиту активну енергію $WP(I_b, U_j)$ визначають за формулою

$$WP(I_b, U_j) = k_u \cdot k_i \cdot WP_n(I_2, U_2), \quad (1)$$

де k_u - номінальний коефіцієнт трансформації трансформатора напруги,

k_i - номінальний коефіцієнт трансформації трансформатора струму,

$WP_n(I_2, U_2)$ - покази лічильника активної енергії, кВт год.

В реальних умовах завантаження первинних кіл трансформаторів струму набагато нижче за номінальне. Похибки трансформаторів струму при роботі в зоні $(0.05 \pm 0.2) \cdot I_{ном}$ в 1.5 - 3.0 рази більше відповідного їх класу (Железко Ю.С. Оценка потерь электроэнергии, обусловленных инструментальными погрешностями измерения - Электрические станции, 2001, № 8). Похибки трансформаторів напруги обумовлені як струмами намагнічування, так і завантаженням їх вторинних обмоток. Перевантаження вторинних обмоток трансформаторів напруги веде до появи від'ємних амплітудних похибок.

Якщо залежності амплітудних похибок трансформаторів струму і напруги від режиму роботи вимірювального комплексу відомі, можна поліпшити точність вимірювань. Відомий спосіб вимірювання активної потужності і енергії (Лоскутов А.Б., Солнцев Е.Б., Озеров И.В. Влияние погрешности трансформаторов тока и напряжения на коммерческие потери в энергосистемах - www.koi.innov.ru/nice/Journal/Loskuto_1.htm), який дозволяє врахувати амплітудні похибки вимірювальних трансформаторів. Спожиту активну енергію $WP(I_b, U_j)$ при реалізації способу визначають за формулою

$$WP(I_b, U_j) = \sum_n \left(1 - \frac{\delta_i(I_{1n})}{100} \right) \left(1 - \frac{\delta_u(S_{Ujn})}{100} \right) k_i \cdot k_u \cdot P_B(I_{2n}, U_{2n}) \cdot T_n, \quad (2)$$

де $\delta_u(S_{Ujn})$ - амплітудна похибка трансформатора напруги в залежності від завантаження його вторинних кіл в n -ний часовий інтервал, %;

$\delta_i(I_{1n})$ - амплітудна похибка трансформатора струму в залежності від струму його первинної обмотки в n -ний часовий інтервал, %;

T_n - тривалість n -ного часового інтервалу із сталим навантаженням,

$P_B(I_{2n}, U_{2n})$ - активна потужність, що виміряна приладом в n -ний часовий інтервал n -ний часовий інтервал із сталим навантаженням, Вт,

T_n - тривалість n -ного часового інтервалу

Відомий спосіб врахування фазової складової похибки при вимірюванні активної потужності

(Танкевич Є.М., Яковлева І.В. Вплив фазової складової похибок компонентів вимірювальних комплексів на точність вимірювання потужності та обліку електричної енергії - Энергетика и электрификация, 2001, № 5), коли відносно похибку вимірювань визначають за формулою

$$\delta(I_b, U_b, S_{Uj}) = \cos \Delta \theta(I_b, S_{Uj}) - I + \operatorname{tg} \varphi(I_b, U_j) - \sin \Delta \theta(I_b, S_{Uj}), \quad (3)$$

де $\Delta \theta(I_b, S_{Uj}) = \Delta \varphi_i(I_j) - \Delta \varphi_u(S_{Uj})$ - сумарна фазова похибка вимірювального комплексу,

$\Delta \varphi_u(S_{Uj})$ - фазова похибка трансформатора напруги в залежності від завантаження його вторинних кіл,

$\Delta \varphi_i(I_j)$ - фазова похибка трансформатора струму в залежності від струму його первинної обмотки,

$\varphi(I_b, U_j)$ - кут зсуву фаз напруги і струму на затискачах споживача

Спожиту активну енергію у цьому випадку можна обчислити за формулою

$$WP(I_b, U_j) = \sum_n P_B(I_{2n}, U_{2n}) \cdot k_i \cdot k_u \cdot \left(1 - \frac{\delta(I_{1n}, U_{1n}, S_{Ujn})}{100} \right) T_n \quad (4)$$

При перевантажених вторинних обмотках трансформаторів напруги і недовантажених первинних обмотках трансформаторів струму спостерігається значна від'ємна систематична похибка вимірювального комплексу, яка обумовлена електромагнітними процесами в матеріалі осердь вимірювальних трансформаторів і їх обмотках. Тому, при визначенні фактичної спожитої активної енергії необхідно враховувати як амплітудні, так і фазові похибки вимірювальних трансформаторів.

Винаходом ставиться завдання зменшення результуючої похибки вимірювального комплексу, який складається з вимірювальних приладів і трансформаторів струму і напруги.

Поставлене винаходом завдання досягається тим, що вимірювання спожитої активної енергії згідно винаходу здійснюють у такій послідовності: експериментально визначають залежності фазових $\Delta \varphi_i(I_j)$ і амплітудних $\delta_i(I_j)$ похибок трансформаторів струму від струму їх первинних обмоток або виконують інтерполяцію цих залежностей за результатами заводських випробувань,

експериментально визначають залежності фазових $\Delta \varphi_u(S_{Uj})$ і амплітудних $\delta_u(S_{Uj})$ похибок трансформатора напруги від завантаження його вторинних кіл або виконують інтерполяцію цих залежностей за результатами випробувань,

вимірюють завантаження вторинних кіл трансформатора напруги S_{Uj} ,

в комплекс для вимірювання спожитої активної енергії, який складається з вимірювальних трансформаторів і приладу для вимірювання активної потужності (енергії), вмикають прилад для вимірювання реактивної потужності (енергії),

виконують вимірювання активної $P_B(I_2, U_2)$ і реактивної $Q_B(I_2, U_2)$ потужностей (активної $WP_B(I_2, U_2)$ і реактивної $WQ_B(I_2, U_2)$ енергій) у колі за допомогою увімкнутих приладів,

а фактичну спожиту активну енергію обчислюють за формулами

$$WP_{\Phi}(I_1, U_1) = k_U \cdot k_I \cdot \sum_n [P_B(I_{2n}, U_{2n}) \cos(\Delta\varphi_U(S_{U_n}) - \Delta\varphi_I(I_{1n})) + \\ + Q_B(I_{2n}, U_{2n}) \sin(\Delta\varphi_U(S_{U_n}) - \Delta\varphi_I(I_{1n}))] \times \\ \times (1 - \delta_U(S_{U_n}) - \delta_I(I_{1n}) + \delta_U(S_{U_n}) \cdot \delta_I(I_{1n})) \cdot T_n, \quad (5)$$

або

$$WP_{\Phi}(I_1, U_1) = k_U \cdot k_I \cdot \sum_n [WP_B(I_{2n}, U_{2n}) \cos(\Delta\varphi_U(S_{U_n}) - \Delta\varphi_I(I_{1n})) + \\ + WQ_B(I_{2n}, U_{2n}) \sin(\Delta\varphi_U(S_{U_n}) - \Delta\varphi_I(I_{1n}))] \times \\ \times (1 - \delta_U(S_{U_n}) - \delta_I(I_{1n}) + \delta_U(S_{U_n}) \cdot \delta_I(I_{1n})), \quad (5a)$$

де k_I - номінальний коефіцієнт трансформації трансформатора струму,

k_U - номінальний коефіцієнт трансформації трансформатора напруги,

$P_B(I_{2n}, U_{2n})$ - покази приладу для вимірювання активної потужності в n -ний часовий інтервал із сталим навантаженням,

$Q_B(I_{2n}, U_{2n})$ - покази приладу для вимірювання реактивної потужності в n -ний часовий інтервал із сталим навантаженням,

$\Delta\varphi_U(S_{U_n})$ - фазова похибка трансформатора напруги в n -ний часовий інтервал із сталим навантаженням,

$\Delta\varphi_I(I_{1n})$ - фазова похибка трансформатора струму в n -ний часовий інтервал із сталим навантаженням,

$\delta_U(S_{U_n})$ - амплітудна похибка трансформатора напруги в n -ний часовий інтервал із сталим навантаженням,

$\delta_I(I_{1n})$ - амплітудна похибка трансформатора струму в n -ний часовий інтервал із сталим навантаженням,

T_n - тривалість n -ного часового інтервалу із сталим навантаженням,

$WP_B(I_{2n}, U_{2n})$ - спожита за показами приладу активна енергія в n -ний часовий інтервал із сталим навантаженням,

$WQ_B(I_{2n}, U_{2n})$ - спожита за показами приладу реактивна енергія в n -ний часовий інтервал із сталим навантаженням

На фіг наведені результати розрахунку результуючої (фактичної) похибки вимірювального комплексу (у відсотках) за формулою

$$\delta_{\Phi} = \frac{P - P_{\Phi}}{P_{\Phi}} \cdot 100, \quad (6)$$

де по осі абсцис відкладені завантаження первинних обмоток трансформаторів струму вимірювальних комплексів (у відсотках), а по осі ординат - завантаження вторинних обмоток трансформатора напруги (у відсотках). Лінії у площині фіг - лінії рівних похибок вимірювального комплексу, обумовлених амплітудними і фазовими похибками вимірювальних трансформаторів струму та напруги, при різноманітних комбінаціях завантажень первинних обмоток трансформаторів струму і вторинних обмоток трансформатора напруги і сталому коефіцієнті потужності $\cos\phi=1$. З наведеної фігури видно, що результуюча похибка вимірювального комплексу лишається від'ємною при всіх можливих комбінаціях завантажень

вимірювальних трансформаторів

Таким чином, формули (5) і (5a), які враховують амплітудні і фазові похибки вимірювальних трансформаторів, дозволяють уточнити фактичне значення спожитої активної енергії при різноманітних значеннях коефіцієнту потужності споживача і завантаження вимірювальних трансформаторів

Розглянемо вимірювальний комплекс, що складається з приладів для вимірювання потужностей (енергій) і трансформаторів струму та напруги. Нехай струм у вторинній обмотці трансформатора струму - синусоїдна функція часу

$$I_2(t) = I_{m2} \sin(\omega t + \varphi_{I2}) \quad (7)$$

а напруга вторинної обмотки трансформатора напруги - синусоїдна функція

$$U_2(t) = U_{m2} \sin(\omega t + \varphi_{U2}) \quad (8)$$

З врахуванням коефіцієнту трансформації k_I амплітудної δ_I фазової $\Delta\varphi_I$ похибок трансформатора струму зв'язок між струмами первинної і вторинної обмотки можна записати у вигляді

$$I_1(t) = I_{m1} \sin(\omega t + \varphi_{I1}) = k_I [I_{m2} - I_{m2} \delta_I(I_1)] \sin(\omega t + \varphi_{I2} + \pi - \Delta\varphi_I(I_1)) \quad (9)$$

Для трансформатора напруги цей зв'язок записується аналогічно

$$U_1(t) = U_{m1} \sin(\omega t + \varphi_{U1}) = k_U [U_{m2} - U_{m2} \delta_U(S_{U1})] \times \sin(\omega t + \varphi_{U2} + \pi - \Delta\varphi_U(S_{U1})) \quad (10)$$

Визначимо фактичну активну потужність споживача, скориставшись (9) і (10)

$$P_{\Phi}(I_1, U_1) = \frac{1}{T} \int_0^T u_1(t) i_1(t) dt =$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T k_U [U_{m2} - U_{m2} \delta_U(S_{U1})] \sin(\omega \cdot t + \varphi_{U2} + \pi + \Delta\varphi_U(S_{U1})) \times$$

$$\times k_I [I_{m2} - I_{m2} \delta_I(I_1)] \sin(\omega \cdot t + \varphi_{I2} + \pi + \Delta\varphi_I(I_1)) dt =$$

$$\frac{k_U k_I}{T} \int_0^T [U_{m2} I_{m2} \sin(\omega \cdot t + \varphi_{I2} + \pi + \Delta\varphi_U(S_{U1})) \times$$

$$\times \sin(\omega \cdot t + \varphi_{I2} + \pi + \Delta\varphi_I(I_1)) dt -$$

$$- \frac{k_U k_I}{T} \int_0^T [U_{m2} I_{m2} \delta_I(I_1) \sin(\omega \cdot t + \varphi_{I2} + \pi + \Delta\varphi_U(S_{U1})) \times$$

$$\times \sin(\omega \cdot t + \varphi_{I2} + \pi + \Delta\varphi_I(I_1)) dt -$$

$$- \frac{k_U k_I}{T} \int_0^T [U_{m2} \delta_U(S_{U1}) I_{m2} \sin(\omega \cdot t + \varphi_{I2} + \pi + \Delta\varphi_U(S_{U1})) \times$$

$$\times \sin(\omega \cdot t + \varphi_{I2} + \pi + \Delta\varphi_I(I_1)) dt +$$

$$+ \frac{k_U k_I}{T} \int_0^T [U_{m2} \delta_U(S_{U1}) I_{m2} \delta_I(I_1) \sin(\omega \cdot t + \varphi_{I2} + \pi + \Delta\varphi_U(S_{U1})) \times$$

$$\times \sin(\omega \cdot t + \varphi_{I2} + \pi + \Delta\varphi_I(I_1)) dt. \quad (11)$$

Під інтегралами в правій частині виразу (11) - синусоїдні функції часу однієї частоти, тому, переходячи до діючих значень струму і напруги вторинних обмоток вимірювальних трансформаторів, отримуємо

$$P_{\Phi}(I_1, U_1) = k_U k_I (U_2 I_2 - U_2 I_2 \delta_I(I_1) - U_2 I_2 \delta_U(S_U) + U_2 I_2 \delta_U(S_U) \delta_I(I_1)) \times \\ \times \cos(\varphi_{U_2} - \Delta\varphi_U(S_U) - (\varphi_{I_2} - \Delta\varphi_I(I_1))) \quad (12)$$

Враховуючи що

$$P_B(I_2, U_2) = U_2 I_2 \cos(\varphi_{U_2} - \varphi_{I_2}); \quad (13)$$

$$Q_B(I_2, U_2) = U_2 I_2 \sin(\varphi_{U_2} - \varphi_{I_2}),$$

і групуючи доданки аргументу синусоїдної функції у (12), останню можна записати у вигляді

$$P_{\Phi}(I_1, U_1) = k_U \cdot k_I [P_B(I_2, U_2) \cos(\Delta\varphi_U(S_U) - \Delta\varphi_I(I_1)) + \\ + Q_B(I_2, U_2) \sin(\Delta\varphi_U(S_U) - \Delta\varphi_I(I_1))] \times \\ \times (1 - \delta_U(S_U) - \delta_I(I_1) + \delta_U(S_U) \cdot \delta_I(I_1)). \quad (14)$$

Спожита протягом інтервалу часу із сталим навантаженням T_n активна енергія може бути обчислена за формулою

$$WP_{\Phi}(I_{1n}, U_{1n}, S_{U_n}) = P_{\Phi}(I_{1n}, U_{1n}, S_{U_n}) T_n \quad (15)$$

Тоді спожиту активну енергію можна обчислити за формулами

$$WP(I_1, U_1) = \sum_n P_{\Phi}(I_{1n}, U_{1n}, S_{U_n}) T_n; \quad (16)$$

$$WP(I_1, U_1) = \sum_n WP_{\Phi}(I_{1n}, U_{1n}, S_{U_n}), \quad (16a)$$

де $P_{\Phi}(I_{1n}, U_{1n}, S_{U_n})$ і $WP_{\Phi}(I_{1n}, U_{1n}, S_{U_n})$ - виміряні за допомогою приладів протягом інтервалу часу із сталим навантаженням активна потужність та активна енергія

Підставивши в (16) та (16a) значення активної потужності з (14) та (15) отримуємо

$$WP_{\Phi}(I_1, U_1) = k_U k_I \sum_n [P_B(I_{2n}, U_{2n}) \cos(\Delta\varphi_U(S_{U_n}) - \Delta\varphi_I(I_{1n})) + \\ + Q_B(I_{2n}, U_{2n}) \sin(\Delta\varphi_U(S_{U_n}) - \Delta\varphi_I(I_{1n}))] \times \\ \times (1 - \delta_U(S_{U_n}) - \delta_I(I_{1n}) + \delta_U(S_{U_n}) \cdot \delta_I(I_{1n})) T_n, \quad (17)$$

та

$$WP_{\Phi}(I_1, U_1) = k_U k_I \sum_n [WP_B(I_{2n}, U_{2n}) \cos(\Delta\varphi_U(S_{U_n}) - \Delta\varphi_I(I_{1n})) + \\ + WQ_B(I_{2n}, U_{2n}) \sin(\Delta\varphi_U(S_{U_n}) - \Delta\varphi_I(I_{1n}))] \times \\ \times (1 - \delta_U(S_{U_n}) - \delta_I(I_{1n}) + \delta_U(S_{U_n}) \cdot \delta_I(I_{1n})), \quad (17a)$$

де k_I - номінальний коефіцієнт трансформації трансформатора струму,

k_U - номінальний коефіцієнт трансформації трансформатора напруги,

$P_B(I_{2n}, U_{2n})$ покази приладу для вимірювання активної потужності в n -ний часовий інтервал із сталим навантаженням,

$Q_B(I_{2n}, U_{2n})$ покази приладу для вимірювання реактивної потужності в n -ний часовий інтервал із сталим навантаженням,

$\Delta\varphi_U(S_{U_n})$ - фазова похибка трансформатора напруги в n -ний часовий інтервал із сталим навантаженням,

$\Delta\varphi_I(I_{1n})$ - фазова похибка трансформатора струму в n -ний часовий інтервал із сталим навантаженням,

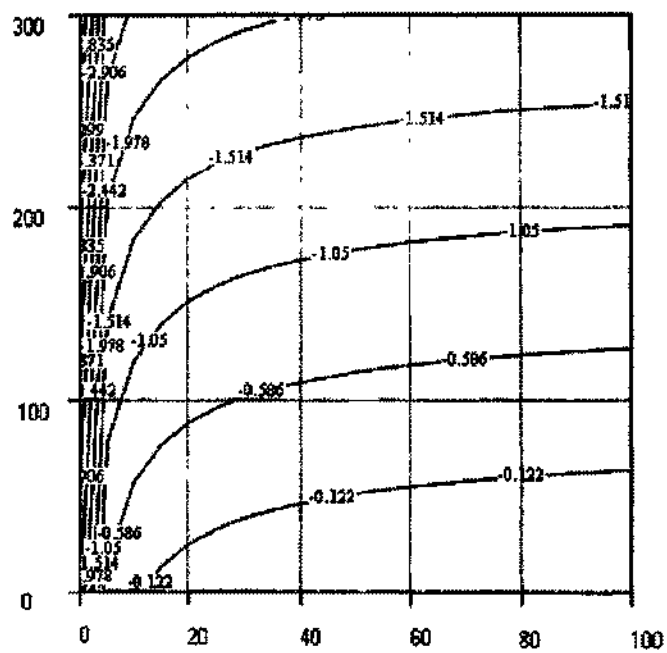
$\delta_U(S_{U_n})$ - амплітудна похибка трансформатора напруги в n -ний часовий інтервал із сталим навантаженням,

$\delta_I(I_{1n})$ - амплітудна похибка трансформатора струму в n -ний часовий інтервал із сталим навантаженням,

T_n - тривалість n -ного часового інтервалу із сталим навантаженням,

$WP_B(I_{2n}, U_{2n})$ спожита за показами приладу активна енергія в n -ний часовий інтервал із сталим навантаженням,

$WQ_B(I_{2n}, U_{2n})$ - спожита за показами приладу реактивна енергія в n -ний часовий інтервал із сталим навантаженням



Фиг.